

**ANÁLISIS DE LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE  
DISTRIBUCIÓN CON  
GENERACIÓN DISTRIBUIDA**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:  
ANÁLISIS DE LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS  
DE DISTRIBUCIÓN CON  
GENERACIÓN DISTRIBUIDA**

**AUTOR:  
JORGE EDUARDO CORTEZ CALDERÓN**

**DIRECTOR:  
RAMÓN ENRIQUE PÉREZ PINEDA**

**Quito, julio del 2017**

Jorge Eduardo Cortez Calderón

**ANÁLISIS DE LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS  
DE DISTRIBUCIÓN CON  
GENERACIÓN DISTRIBUIDA**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2017

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña de autores e información de contacto:



**Jorge Eduardo Cortez Calderón** (Y'1990-N'25) nació en Quito el 31 de mayo se graduó en el Instituto Tecnológico Central Técnico Egresado de la Universidad Politécnica Salesiana en la Facultad de Ingeniería Eléctrica. Su trabajo se basa en el análisis de fallas en sistemas eléctricos de distribución con generación distribuida.  
[jcortezc@est.ups.edu.ec](mailto:jcortezc@est.ups.edu.ec)

Dirigido por:



**Ramón Enrique Pérez Pineda (Y'1981-M'11)**. Se graduó de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Politécnica Antonio José de Sucre en Venezuela. Msc. Scientiarum en Ingeniería Eléctrica, actualmente está trabajando para lograr su título de Doctor en Ciencias de la Ingeniería. Es docente de la Universidad Politécnica Salesiana, miembro del grupo de investigación GIREI con énfasis en la inteligencia artificial aplicada a sistemas eléctricos y redes inteligentes.  
[rperezp@ups.edu.ec](mailto:rperezp@ups.edu.ec)

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.


**DERECHOS RESERVADOS**

©2017 Universidad Politécnica Salesiana  
QUITO-ECUADOR

### **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A**

Yo, Ramón Enrique Pérez Pineda declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación *ANÁLISIS DE LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA* realizado por Jorge Eduardo Cortez Calderón, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, julio de 2017



.....

Ramón Enrique Pérez Pineda

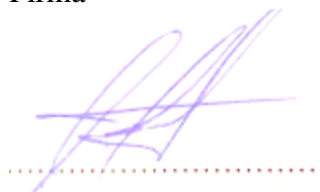
Cédula de identidad: 0959948290

## **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR**

Yo, Jorge Eduardo Cortez Calderón, con documento de identificación N° 1720008372, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor/es del trabajo de grado/titulación intitulado: “ Análisis de localización de fallas en sistemas eléctricos de distribución con generación distribuida”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Firma



Nombre: Jorge Eduardo Cortez Calderón

Cédula: 1720008372

Fecha:

## ***INDICE GENERAL***

Resumen.....	3
1. Introducción .....	5
2. Sistemas de Distribución Eléctrica. ....	6
2.1 Configuración y Características de un sistema de Distribución Eléctrica. ....	6
2.2 Generación Distribuida .....	6
2.3 Fallas en el sistema de Distribución.....	7
2.4 Métodos de localización de fallas. ....	8
3. Formulación del Problema .....	9
3.1 Metodología propuesta para localizar fallas en sistemas de distribución con GD. 9	
3.2 Algoritmo para determinar la localización de fallas con GD.....	11
4. Resultados y Discusión.....	12
4.1 Falla Monofásica.....	12
4.2 Falla Bifásica.....	13
4.3 Falla Bifásica Tierra.....	13
4.4 Falla Trifásica.....	13
4.5 Falla Monofásica.....	14
4.6 Falla Bifásica.....	14
4.7 Falla Bifásica Tierra.....	14
4.8 Falla Trifásica.....	15
5. Conclusiones .....	15
6. Referencias .....	15
6.1. Estado del Arte.....	18

## ***INDICE DE FIGURAS***

Figura 1. Sistema De Distribución Eléctrica Radiales .....	6
Figura 2. Sistema Eléctrico De Distribución con Generación Distribuida .....	7
Figura 3. Tipos de fallas (a) fase a tierra, (b) fase a fase, (c) dos fases a tierra, (d) tres fases, (e) tres fases a tierra. ....	8
Figura 4. Circuitos equivalentes de un sistema de distribución bajo falla con GD. ....	9
Figura 5. Adquisición de valores complejos en el troncal principal: a) medidor fasorial en Subestación, b) medidor fasorial en GD. ....	11
Figura 6. a) Corriente desde la subestación sin GD, b) Corriente desde la subestación con GD .....	12
Figura 7. Error falla monofásica. ....	12
Figura 8. Error falla Bifásica.....	13
Figura 9. Error falla Bifásica Tierra. ....	13
Figura 10. Error falla trifásica. ....	13
Figura 11. SD con GD en nodos 816 y 826 .....	14
Figura 12. Error falla monofásica, con GD en nodos 816 y 826. ....	14
Figura 13. Error falla bifásica con GD en nodos 816 y 826 .....	14
Figura 14. Error falla bifásica tierra con GD en nodos 816 y 826. ....	14
Figura 15. Error falla trifásica con GD en nodos 816 y 826. ....	15

## ***INDICE DE TABLAS***

Tabla 1.- Pseudocódigo de método de localización .....	11
Tabla 2.- Matriz de estado del arte.....	18
Tabla 3.- Resumen e Indicadores del estado del arte .....	22



# ANÁLISIS DE LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA

## Resumen.

Los Sistemas de Distribución (SD) son parte fundamental del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP), ya que estos interconectan la transmisión con los consumidores finales, por tal razón la continuidad del servicio es un importante índice para suprimir la Energía No Suministrada (ENS) y mejorar la calidad del servicio, con ello se proporciona mayor eficiencia a la red de comercialización. Las interrupciones del SD pueden ser programadas por labores de mantenimiento y también no programadas las cuales se deben a fallas. Las fallas son interrupciones abruptas del suministro por lo tanto la localización de fallas debe ser exacta para disminuir el tiempo de interrupción del suministro. Uno de los factores determinantes en mejorar la calidad de los SD es la implementación de generadores lo más cercanos de las cargas, se denomina Generación Distribuida (GD), cuya implementación causa efectos en el flujo de potencia de los SD.

Este trabajo propone una metodología basada en la impedancia de la línea, utilizando los valores de voltaje y corriente en pre y pos falla, medidos desde la subestación de transformación así como también en la GD, la metodología se aplicará al troncal principal del sistema IEEE de 34 nodos, simulando cuatro tipos de fallas, monofásica, bifásica, bifásica

tierra, trifásica, con dos diferentes resistencias de falla, de 20 Ohms y 40 Ohms, en dos casos, el primer caso contempla la implementación de GD en el nodo 816, el segundo caso contempla la implementación de GD en los nodos 816 y 826.

Los resultados del modelado permiten analizar las variaciones al localizar fallas con la implementación de la GD.

**Palabras Clave:** Generación Distribuida, Fallas, Localización de Fallas, Sistemas de Distribución Eléctrica

## Abstract.

Distribution Systems (SD) are a fundamental part of the Power Electrical System (SEP), because they are interconnect the transmission with the final consumers, for this reason the continuity of the service is important, to reduce the Energy Not Supplied (ENS) and improve the quality of the service with this provides greater efficiency to the consumers network. The interruptions of SD can be programmed by maintenance and also unscheduled, which are due to failures. The failures are abrupt interruptions of supply, therefore the location of faults must be exact, to reduce the time of interruption of supply, one of

the determining factors in improving the quality of SD is implementation of generators closest to the loads, called Distributed Generation (GD) whose implementation causes effects on the power flow of SD. This work proposes a methodology based on the impedance of the line, using values of voltage and current in pre and post failure.

measured from the transformation substation as well as in the GD, the methodology will be applied to the main trunk of the IEEE system. 34 nodes, simulating four types of faults, single-phase, biphasic, biphasic earth, three-phase, with two different fault resistors, 20 Ohms and 40 Ohms, in two cases, the first case contemplates the implementation of GD at node 816, Second case contemplates the implementation of GD in nodes 816 and 826.

The results of the modeling allow to analyze the variations when locating faults with the implementation of the DG.

**Keywords:** Distributed Generation, Fault Locations, Fault Locations, Electrical Distribution Systems

## 1. Introducción.

La calidad de energía en el SD ha sido objeto de varias investigaciones que prestan interés ya sea para operadores como para usuarios finales los cuales son parte fundamental de los SD, beneficiarios al mejorar la confiabilidad del sistema [1]. La continuidad del suministro de energía es el proceso que debe tender a ser el más eficiente entre otros como, valores estandarizados del servicio y mantenimientos rutinarios.

Los SD de energía eléctrica son parte esencial ante la sociedad moderna, por esta razón cuando ocurre una interrupción en el SD, es importante la localización exacta de falla para acelerar la restauración del sistema [2], con el fin de reducir el tiempo de interrupción del servicio y mediante este proceso mejorar la confiabilidad del SD, las fallas más comunes que alteran la continuidad del servicio son fallas por descargas atmosféricas, averías por falta de mantenimiento, cambios repentinos de carga, maniobras inadecuadas por operadores del SD, estas fallas son determinantes en el proceso de minimizar pérdidas en el SD y así obtener la menor cantidad ENS, y proporcionar mayor eficiencia a la red de comercialización [3][4].

Otro de los factores importantes para mejorar la confiabilidad del SD, es conectar GD al SD, los cuales son centros de generación que se encuentran lo más cerca posible a las cargas, para mejorar las pérdidas de potencia en las cargas y reducir la ENS [5][6], el ingreso de la GD aumenta la confiabilidad del sistema al ocurrir una falla, ya que esto mejora la flexibilidad del SD [7], mejora la calidad de energía y aumenta la fiabilidad [8], pero el ingreso de GD al SD genera inconvenientes, ya que estos producen un

cambio considerable en algunas características técnicas-operativas del SD, como la variación de voltajes y corrientes en el flujo de potencia del SD.

Algunos autores en el pasado han desarrollado varios métodos de localización de fallas, basándose en la relación de voltaje y corriente de falla, para generar una impedancia aparente y localizar la distancia de falla [2], otros localizan la sección de falla y luego estiman la distancia de falla en esa sección [3], también utilizan los valores fundamentales de corriente y voltaje, en estado de pre y pos falla.

En sí para localizar una falla se necesita obtener los valores de voltaje y corriente, estos valores pueden ser obtenidos de un flujo de potencia del SD para esto en [4], utiliza medidores ubicados en la red para determinar voltajes y corrientes en los puntos de falla, medidos desde las subestaciones.

En [9] se ayuda mediante los datos de monitoreo del alimentador principal, para aplicar su método de localización, la literatura es amplia al localizar una falla en SD.

En este artículo se analizará la localización de fallas en un SD con la implementación de GD en diferentes puntos del SD, para ello, se aplica un modelo matemático iterativo que estima la distancia de falla medida desde la subestación de transformación.

En la sección 2, trata los SD, su configuración y características, también se detallan los tipos de fallas que afectan los SD, así como también los métodos de localización de fallas. En la sección 3, se realiza un detalle del problema, así como también la metodología propuesta y el

algoritmo para localizar fallas en los SD con GD. En la sección 4, se discuten y analizan resultados, con los diferentes casos de estudio. La sección 6, está dedicada a concluir y resumir las principales aportaciones.

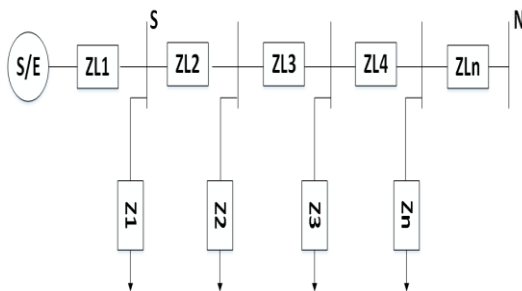
## 2. Sistemas de Distribución Eléctrica.

Son parte fundamental en los SEP, ya que luego de pasar etapas de reducción de voltaje realiza la interconexión entre la transmisión del SEP, con la red de comercialización hacia los consumidores.

Las topologías son importantes y fundamentales en los SD, una de las configuraciones es la red radial, esta red es típica en los SD [10], ya que son redes muy sencillas en operación y control, la segunda topología es denominada anillo, la que forma un circuito cerrado, logrando que los consumidores se instalen entre los transformadores, lo que aumenta la complejidad de la red.

Estas topologías pueden ser implementadas como una red en anillo unidas de forma radial, esto hace que la topología sea muy compleja, esta combinación es denominada red mallada.

En la figura 1 se muestra la configuración típica de un SD.



**Figura 1.** Sistema Radial De Distribución Eléctrica

### 2.1 Características De Sistemas De Distribución Eléctrica.

La topología y configuración de los SD eléctrica son importantes al momento de determinar el punto de falla, ya sean estas de tipo operativas o físicas, por ejemplo el diseño de todos los alimentadores, longitudes de cables y otros elementos deben ser heterogéneos, así como los sistemas podrían ser balanceados o son desbalanceados, y uno de los criterios por el cual el sistema tiende a ser inestable es por el número de derivaciones que se encuentran en el SD [11].

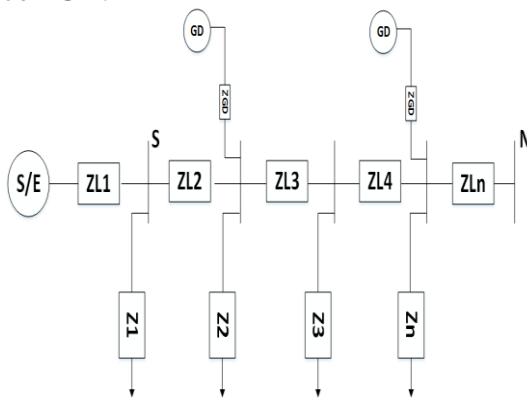
### 2.2 Generación Distribuida

No existe una definición como tal para determinar que es la GD, sin embargo, la mayoría de sistemas se basan en la generación de energía eléctrica centralizada en grandes proporciones y en una sola dirección [12]. La implementación de generadores que se encuentren cercanos de la carga proporciona beneficios [13], uno de ellos es minimizar las pérdidas del sistema por lo tanto su ubicación es necesaria en el SD [14]-[15], esto ayuda a que el sistema tenga menos pérdidas, reduce la carga y mejora la calidad del servicio disminuyendo la ENS [16]-[17].

Las empresas de distribución eléctrica pueden implementar estos generadores que por lo común, utilizan fuentes de energía primaria renovable [10], de esta forma también reducen de forma significativa el nivel de contaminación y ayudan a que el sistema sea más eficiente y preste mayor seguridad al SD [18]-[19].

La GD en los SD producen un cambio significativo en el análisis técnico-operativo de la red, convirtiéndola en una red bidireccional, es por esta razón que la implementación de la GD, representa

Por lo tanto, para este artículo los GD se definirán como pequeñas fuentes de generación eléctrica que se encuentran instalados en la etapa de distribución eléctrica del SEP lo más cercanos de las cargas y permiten mejorar la confiabilidad del SD. En la figura 2 se muestra un SD con GD.



**Figura 2.** Sistema Eléctrico De Distribución con Generación Distribuida

Las fallas en los sistemas de distribución eléctrica, es tema que se encuentra en mucha literatura ya que la continuidad del servicio ha sido uno de los aspectos más importantes al evaluar la calidad del servicio.

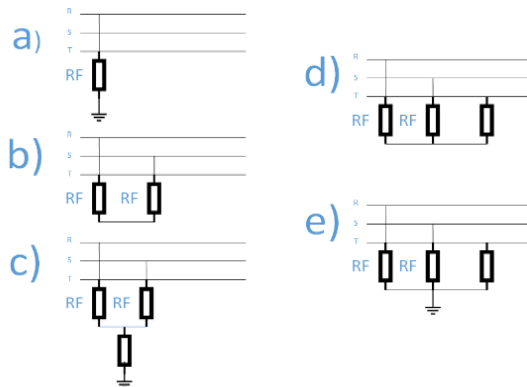
Las interrupciones del sistema de distribución pueden ser programadas y no

Las interrupciones no programadas pueden afectar a una o varias fases del SD, para cada caso la corriente y voltaje de corto circuito es diferente [23].

Cuando dos de las fases tiene conexión entre sí, se denomina falla bifásica, esto afecta los valores de corriente y voltaje según la impedancia de falla, lo cual produce un desbalance en la fase que no es afectada, esto se puede observar en la figura 3.b.

Cuando en una interrupción se afectan las 3 fases ocurre una conexión directa entre las tres fases, como se muestra en 3.d, esto genera un efecto de corriente o cual genera que se eleve considerablemente y el voltaje disminuya según la impedancia de falla, así como también se puede observar la figura 3.e que muestra las tres fases involucradas con tierra, los valores de

voltaje y corriente se determinaran según la impedancia de falla.



**Figura 3.** Tipos de fallas (a) fase a tierra, (b) fase a fase, (c) dos fases a tierra, (d) tres fases, (e) tres fases a tierra.

## 2.4 Métodos de localización de fallas.

La localización de fallas en los sistemas de distribución es efectiva cuando los métodos consideran la no homogeneidad de la línea, así como la topología radial y sumamente ramificada, estos son denominados Métodos Basados en el Modelo (MBM), que tienen como principio, recoger información de diferentes puntos del SD, ya sea voltaje, corriente, caídas de voltaje de líneas, en cualquier punto del SD, para estimar una distancia de falla.

En [24], localiza la falla en dos etapas, en la primera etapa considera analizar el flujo de potencia del SD, con este proceso logra obtener todas las ubicaciones de las posibles fallas.

En esta primera etapa mediante un método algorítmico localiza todas las posibles fallas como ya se mencionó, este método se implementaría para cualquier tipo de falla en las líneas o nodos, este método toma en cuenta si el sistema es balanceado o desbalanceado, así como el efecto capacitivo de las líneas, la segunda etapa de este método consiste en comparar el voltaje medido desde la subestación con

cada nodo hasta que el error sea el mínimo y de esa forma determina la ubicación de la falla.

En [25] utiliza información adicional de los métodos comunes, esto lo hace con el fin de determinar la fuente donde se produce la falla y el alimentador a la que pertenece la línea que este en estado de falla, mediante el registro de la corriente antes y durante la falla, para esto mide los valores en la subestación, para luego clasificar el tipo de falla, posteriormente calcula la caída de voltaje, para obtener la corriente de falla en base a la resistencia de falla, para finalmente calcular una distancia estimada de falla, con referencia a la subestación de transformación.

En [11] compara métodos, que adicional a los MBM, utilizan otros datos como la experiencia del operador en el SD, el historial de fallos en el SD e información externa, estos métodos se denominan Métodos de Clasificación Basados en el Conocimiento (MCBC), que son útiles al analizar las perturbaciones de las ondas, así como también la frecuencia de ocurrencia de una falla, son metodologías que permiten delimitar áreas de localización.

En [12], utiliza un MCBC para la localización de fallas, mediante máquinas de soporte vectorial, la cual zonifica el SD, y permite localizar la falla con GD de forma óptima, y precisa, con la aplicación voltajes RMS, como descriptores.

Nuevos métodos de localización de fallas en SD, se basan en la construcción de Redes Neuronales Artificiales (RNA), estas son un conjunto de unidades que procesan unas con otras, son entrenadas para determinar la distancia desde el punto de falla, hasta la subestación, con entradas de voltaje de fase, corrientes y potencias

que son medidas desde la subestación en pre y pos falla, este método no toma en cuenta las cargas de los consumidores de la red [26]-[27].

### 3. Formulación del Problema

La continuidad del suministro de energía eléctrica es uno de los factores que hacen de los SD confiables, la falla ocurrida en la red de distribución eléctrica afecta significativamente la continuidad del servicio, por tal motivo el despeje de la falla es un factor importante para mejorar la continuidad del suministro.

La implementación de GD, puede afectar el sistema de distribución, estos cambios, modifican el flujo de potencia del SD, a pesar del bajo rango del voltaje nominal que son característicos de los GD, esto afecta la exactitud al momento de localizar fallas en los SD.

Por tal motivo en este artículo se analizará la localización de fallas con la implementación de GD en sistemas de distribución, tomando como referencia el troncal principal del circuito IEEE de 34 nodos.

Se simulará fallas de tipo monofásica, bifásica, bifásica tierra, trifásica, para lo cual se desarrollará un algoritmo que se basa en los voltajes y corrientes en estado de pre y pos falla, medidas desde la sub estación de transformación, y desde la barra en la que se encuentre conectado el GD, de esta manera se determinará la afectación de los GD al localizar fallas.

#### 3.1 Metodología propuesta para localizar fallas en sistemas de distribución con GD.

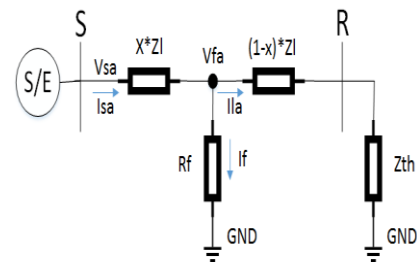
La propuesta para determinar la falla en el SD eléctrica, con GD es mediante la impedancia de líneas, para esto se

analizará el sistema en pre falla, para determinar todos los voltajes y corrientes en las barras, posteriormente se obtendrá la corriente que aporta el GD hasta el punto en donde ocurrió la falla, basándose únicamente en los voltajes y corrientes medidos desde la sub estación de transformación.

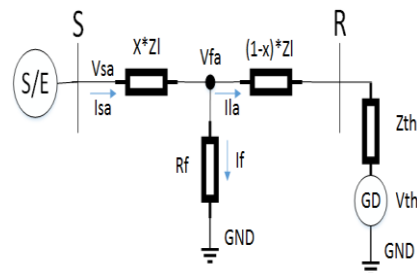
Luego de realizar las mediciones en la sub estación de transformación, se determina si la falla se encuentra aguas arriba o aguas debajo de la GD.

La figura 4.a, representa una falla aguas abajo de la GD el cual estará representado por una carga equivalente  $Z_{th}$ .

Si las fallas se encuentran localizadas aguas arriba de la GD, el sistema bajo falla estará representado por una carga equivalente  $Z_{th}$  y una fuente  $V_{th}$ , como se muestra en la figura 4.b.



a) Sistema de Distribución con falla aguas debajo de GD



b) Sistema de Distribución con falla aguas arriba de GD

**Figura 4.** Circuitos equivalentes de un sistema de distribución bajo falla con GD.

Las siguientes variables son las utilizadas para localizar fallas.

V<sub>sa</sub> Voltaje pre falla fase a  
V<sub>sfa</sub> Voltaje pos falla fase a  
V<sub>th</sub> Voltaje equivalente Thévenin  
I<sub>sa</sub> Corriente pre falla fase a  
I<sub>sfa</sub> Corriente pos falla fase a  
I<sub>la</sub> Corriente de carga en la fase a  
Z<sub>la</sub> Impedancia de la línea en [km]  
Z<sub>th</sub> Impedancia equivalente Thévenin  
Z<sub>1</sub> Impedancia secuencia positiva  
Z<sub>r</sub> Impedancia vista desde nodo R  
x Distancia de falla

Estos datos se obtienen mediante la simulación en un entorno gráfico de una red eléctrica de ATPDraw [28], mediante este programa se adquiere los valores de voltaje y corriente, en la subestación y en el nodo R, tanto en pre falla como en pos falla, posteriormente se utiliza un enlace con software MATLAB, el cual permitirá desarrollar, implementar y probar algoritmos de ingeniería, con procesos matemáticos complejos .

Las siguientes expresiones matemáticas ayudaran a determinar el proceso para determinar la ubicación de la falla.

$$V_{sa} = x(Z_{la} * I_{sa}) + R_f * I_f \quad (1)$$

$$x = \frac{\Im(V_{sa} * I_f^*)}{\Im(Z_{la} * I_{sa} * I_f^*)} \quad (2)$$

$$I_{la} = I_{sa} \quad (3)$$

$$I_f = I_{sfa} - I_{la} \quad (4)$$

$$V_f = V_{sfa} - I_{sfa} * Z_{linea} * x \quad (5)$$

$$Z_{th} = (1 - x) * Z_1 * Z_R \quad (6)$$

$$I_{la} = \frac{V_f}{Z_{th}} \quad (7)$$

$$I_{la} = \frac{V_f - V_{th}}{Z_{th}} \quad (8)$$

$$e(\%) = \left| \frac{x_{real} - x_{est}}{real} \right| * 100\% \quad (9)$$

Suponiendo que la falla está en la fase a, es posible calcular el voltaje de la fase como se muestra en la ecuación (1).

Una vez calculado el voltaje pos falla de la fase a, se calcula con la ecuación (2).

La distancia estimada de falla, tomando en cuenta que  $I_f^*$ , es el conjugado complejo de la corriente de falla, un parámetro importante para el método es asignar a la corriente de carga el valor de la corriente pre falla medida en la subestación como se muestra en la ecuación (3), ya que en este método no toma en cuenta la variación de carga, sino la variación de la resistencia de falla.

La corriente de falla se calcula como la diferencia de la corriente de falla en pos falla de la sub estación, con la corriente de carga, como se muestra en la ecuación (4).

El voltaje de falla, se calcula como se muestra en la ecuación (5), utiliza valores en estado de falla, es decir para esto se utiliza voltajes y corrientes medidas desde la subestación en estado de pos falla.

Si la falla se encuentra aguas debajo de la GD como se muestra en la figura 4.a, se calcula la Z<sub>th</sub>, con la ecuación (6),



posteriormente se calcula la nueva corriente de carga con la ecuación (7).

Si la falla se encuentra aguas arriba de la GD como se muestra en la figura 4.b, se calcula la  $Z_{th}$ , con la ecuación (6), posteriormente se determina el  $V_{th}$ , para aplicar la ecuación (8), y así encontrar la corriente de carga.

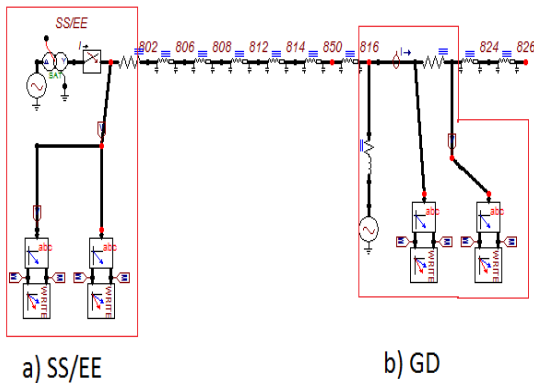
Ya calculados voltajes y corrientes de falla, se actualiza las corrientes de carga y se repite el proceso hasta encontrar la solución.

Para la localización de fallas bifásicas, bifásica tierra y trifásicas, se utiliza la ecuación (10), para la adquisición de voltajes, en estado de pre falla y pos falla, para posterior aplicar el método.

$$\begin{bmatrix} V_{sfa} \\ V_{sfb} \\ V_{sfc} \end{bmatrix} = x * \begin{bmatrix} Z_{la} \\ Z_{lb} \\ Z_{lc} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + R_f * \begin{bmatrix} I_{sfa} - I_{la} \\ I_{sfb} - I_{lb} \\ I_{sfc} - I_{lc} \end{bmatrix} \quad (10)$$

### 3.2 Algoritmo para determinar la localización de fallas con GD.

El circuito de prueba que se utilizará será el troncal principal de la red IEEE de 34 nodos, mediante software ATPDraw.



**Figura 5.** Adquisición de valores complejos en el troncal principal: a) medidor fasorial en Subestación, b) medidor fasorial en GD.

Para determinar los valores de voltaje y corriente en la sub estación y en la GD.

En la figura 5.a, se puede observar la adquisición de valores complejos de voltajes y corrientes medidos en la subestación, así como se visualiza en la figura 5.b, la adquisición de valores complejos de voltajes y corrientes medidos en GD.

Para determinar la distancia de falla se aplicará el siguiente Pseudocódigo.

TABLA 1.- PSEUDOCODIGO DE MÉTODO DE LOCALIZACIÓN

#### PSEUDOCÓDIGO DE DETERMINACIÓN DE DISTANCIA DE FALLA CON LA PRESENCIA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA.

**Paso 1.** Se adquieren los valores de voltaje y corriente mediante la simulación de ATPDraw.

**Paso 2.** Se asume la corriente de carga igual que la corriente pre falla, medida desde la sub estación.

**Paso 3.** Se calcula la corriente de falla con la ecuación (4).

**Paso 4.** Estimación de la distancia de falla con la ecuación (2).

**Paso 5.** Se calcula el voltaje de falla con la ecuación (5), tomando toda la topología de la red, incluyendo el GD.

**Paso 6.** Si la distancia estimada calculada en el paso 4, está aguas debajo del GD, se aplica la ecuación (6) y la ecuación (7), para la actualización de la corriente de carga, si la distancia está aguas arriba de la GD se aplica la ecuación (8).

**Paso 7.** Con la corriente calculada en el paso 6, se actualiza la corriente de carga y retorna al Paso 2.

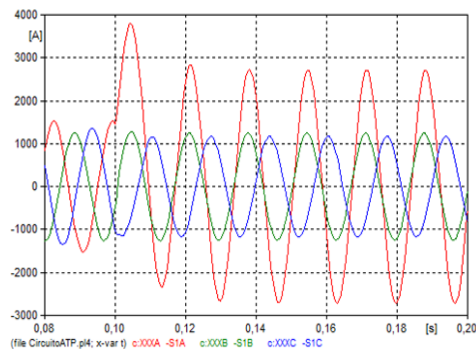
**Paso 8.** Para logara una mejor exactitud se actualizan voltajes y corrientes, posteriormente empieza el proceso iterativo hasta encontrar la sección bajo falla.

**Terminar**

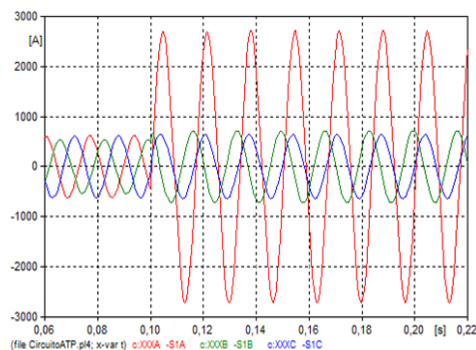
## 4. Resultados y Discusión

### Caso 1.

Considerando la figura 6.a y 6.b, se observa que existe una variación de la corriente medida desde la subestación cuando el sistema es simple y cuando se inyecta GD.



a) Sin Generación Distribuida

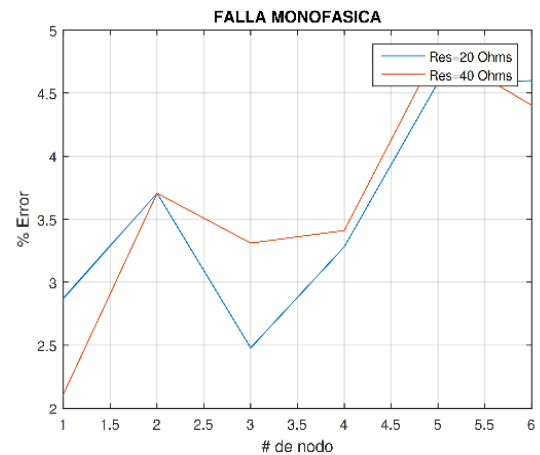


b) Con Generación Distribuida

**Figura 6.** a) Corriente desde la subestación sin GD, b) Corriente desde la subestación con GD

### 4.1 Falla Monofásica.

Considerando la figura 7 se observa el error cometido al determinar fallas monofásicas en el sistema planteado, tomando el eje X como en número de nodo del SD, el eje Y el error obtenido en porcentaje, el cual se lo calcula mediante la ecuación (9).



**Figura 7.** Error falla monofásica.

Para el primer caso, se inyecta una GD en el nodo 816. Se observa en la figura 7, el error con una resistencia de falla de 20 ohm, un rango de 2.87% a 4.7%.

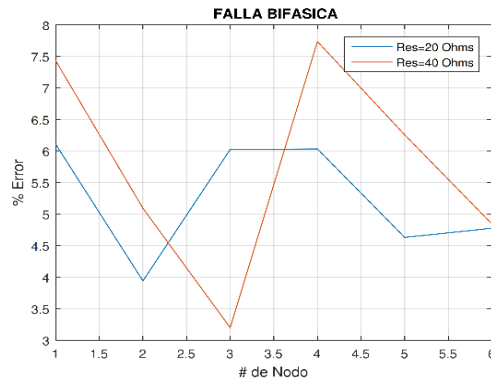
En el caso de la resistencia de falla de 40 ohms, el error está en un rango del 2.11% al 4.9%.

Esto permite determinar que, para las fallas monofásicas a tierra, existe una variación de exactitud en la localización de falla, con variación de resistencia de falla, esto se debe al aumento de la corriente de carga, por lo tanto, los valores del flujo de potencia varían lo que hace que el error aumente.

Se debe tomar en cuenta que en [18], utiliza un método de localización de fallas en base a las impedancias de la línea, sin tomar en cuenta los GD y obtiene valores de error menores a los que se presentan en este artículo, por lo tanto, para las fallas

monofásicas al incluir la GD, disminuye la exactitud en la localización de fallas.

#### 4.2 Falla Bifásica.

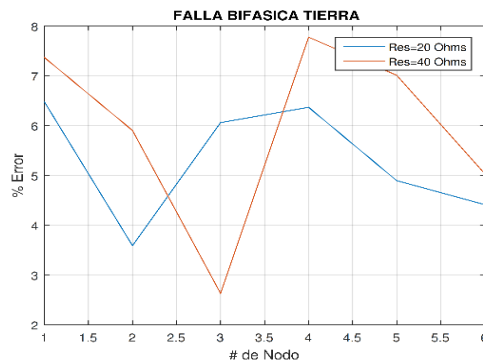


**Figura 8.** Error falla Bifásica

Se observa en la figura 8, el error con una resistencia de falla de 20 ohm, en un rango de 3.97% a 6.1%. En el caso de la resistencia de falla de 40 ohms, el error está en un rango de 3.1% a 7.69%, considerando estos resultados, como en la falla monofásica que la variación de la resistencia de cortocircuito representa un cambio significativo en la localización de fallas, en [25], sin implementar GD en los nodos de prueba, y utilizando métodos basados en la impedancia de la línea, obtiene resultados bajos a comparación a los de este artículo, por lo tanto la implementación de la GD, en las fallas bifásicas disminuye la exactitud al localizar la falla.

#### 4.3 Falla Bifásica Tierra.

#### 4.4

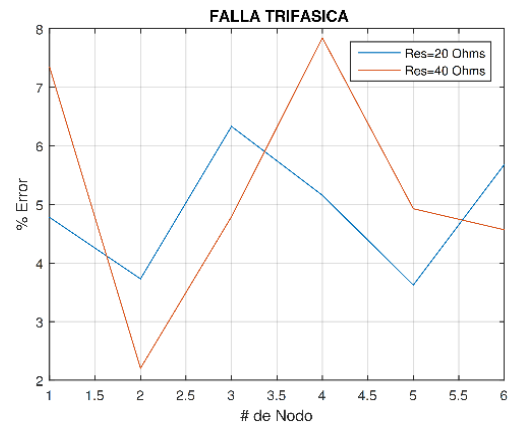


**Figura 9.** Error falla Bifásica Tierra.

Se observa en la figura 9, el error con una resistencia de falla de 20 ohm, un rango de 3.90% a 6.5%.

En el caso de la resistencia de falla de 40 ohms, el error está en un rango de 2.8% a 7.98%, los resultados no difieren en un mayor porcentaje a los discutidos en la falla bifásica.

#### 4.5 Falla Trifásica.



**Figura 10.** Error falla trifásica.

Se observa en la figura 10, el error con una resistencia de falla de 20 ohm, se encuentra en un rango de 2.10% a 6.2%.

En el caso de la resistencia de falla de 40 ohms, el error está en un rango de 2.1% a 7.90%.

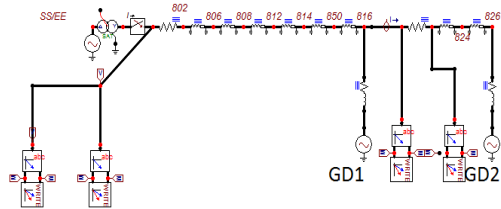
Estos porcentajes de error llegan a confirmar que la variación de la resistencia de falla en el circuito de prueba cambia el flujo de potencia del circuito, en cuanto a voltajes y corrientes, por lo tanto, aumenta el error al localizar la falla.

En [25], luego de aplicar y probar la metodología muestran valores como resultados medianamente menores a los obtenidos en este documento, sin embargo, mediante este análisis se puede

notar la pérdida de exactitud que se obtiene al implementar al circuito un GD.

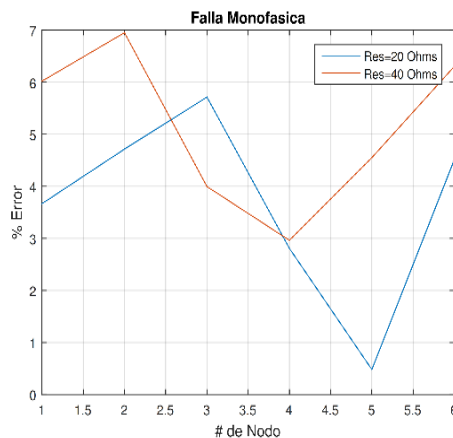
## Caso 2.

Para el segundo caso, se inyecta una GD en el nodo 816 y 826 como muestra la figura 11.



**Figura 11.** SD con GD en nodos 816 y 826

### 4.6 Falla Monofásica.



**Figura 12.** Error falla monofásica, con GD en nodos 816 y 826.

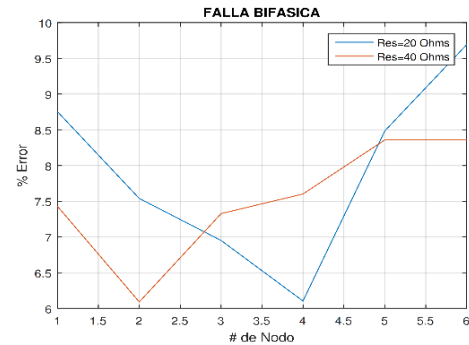
Se observa en la figura 12, el error con una resistencia de falla de 20 ohm, un rango de 0.69% a 5.7%.

En el caso de la resistencia de falla de 40 ohms, el error está en un rango de 3% a 7%.

Estos resultados dan una muestra clara que el sistema sufre un cambio en el flujo de potencia, lo que implica un cambio en la impedancia de la línea al ocurrir una falla, por lo tanto, al implementar GD,

disminuye la exactitud de la localización de fallas.

### 4.6 Falla Bifásica.

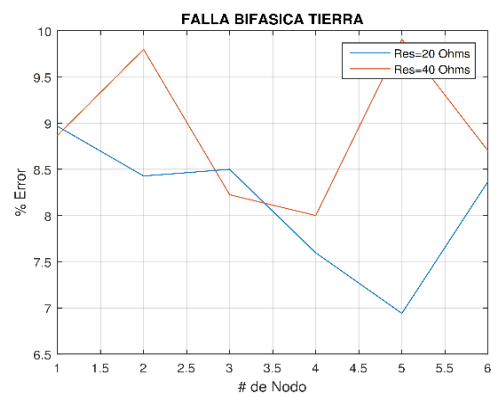


**Figura 13.** Error falla bifásica con GD en nodos 816 y 826

Se observa en la figura 13, el error con una resistencia de falla de 20 ohm, en rango de 6.1% a 9.7%. En el caso de la resistencia de falla de 40 ohms, el error está en rango de 6.1% a 8.4%.

Al comparar los resultados obtenidos con la GD en el nodo 816, con los obtenidos con GD en 816 y 826, se determina la pérdida de exactitud que genera la GD en la localización de fallas.

### 4.7 Falla Bifásica Tierra.



**Figura 14.** Error falla bifásica tierra con GD en nodos 816 y 826.

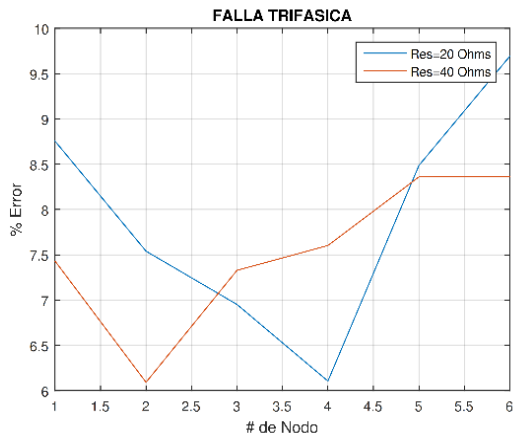
Se observa en la figura 14, el error con una resistencia de falla de 20 ohm, se observa un rango de 6.98% a 9.0%. En el caso de

la resistencia de falla de 40 ohms, el error está en rango de 8% a 8.8%.

Analizando los anteriores resultados con la GD en el nodo 816, se presentaron valores similares entre la bifásica y bifásica tierra, de la misma forma con la implementación de GD en los nodos 816 y 817.

Los valores no presentan un alto grado de diferencia entre la bifásica y la bifásica tierra, sin embargo, se puede determinar que los errores tanto en la resistencia de 20 como en la de 40 ohms, son mayores.

#### 4.8 Falla Trifásica.



**Figura 15.** Error falla trifásica con GD en nodos 816 y 826.

Se observa en la figura 15, el error con resistencia de falla de 20 ohm, se encuentra en rango de 6.1% a 9.6%. En el caso de la resistencia de falla de 40 ohms, el error está en rango de 6.1% a 8.4%.

Analizando y comprando con los resultados anteriores, con GD en nodo 816, se puede diferenciar la variación de error que presenta el método al implementar mayor número de GD al circuito de muestra planteado.

Esto se lo determina ya que el menor error cometido en la falla trifásica con un GD y Resistencia de falla 20 ohms fue de 2.1%

a diferencia del error cometido con dos GD a 20 ohms, el cual fue de 6.98%.

## 5. Conclusiones

En este documento se ha presentado un análisis al efecto que produce la GD en la localización de fallas, usando el método tradicional basado en la impedancia de la línea, con voltajes y corrientes en pre y pos falla, medidos desde la subestación de transformación.

El resultado de las simulaciones es satisfactorio al ser resultados comparables con métodos más robustos y exactos, la penetración de GD, genera una influencia severa en el flujo de potencia del SD, que afecta la exactitud al localizar la falla, lo cual hace que el método basado en las impedancias de la línea sea menos exacto, sin embargo ya que este método es iterativo, puede ayudar a encontrar una primera estimación de la distancia de falla, en métodos más robustos, con lo cual llegaría a ser más eficiente.

## 6. Referencias

- [1] H. Kuang, S. Li, and Z. Wu, "Discussion on advantages and disadvantages of distributed generation connected to the grid," *2011 Int. Conf. Electr. Control Eng. ICECE 2011 - Proc.*, vol. 3, no. 3, pp. 170–173, 2011.
- [2] D. Novosel, D. Hart, Y. Hu, and J. Myllymaki, "System for locating faults and estimating fault resistance in distribution networks with tapped loads," *US Pat. 5,839,093*, p. 20, 1998.
- [3] H. Mohammadpour and R. Dashti, "A New Method Presentation for Fault Location in Power Transformers," *Transm. Distrib. Conf. Expo. Lat. Am.*, vol. 5, no. 6, pp. 334–339, 2011.

- [4] S. J. Lee *et al.*, "An intelligent and efficient fault location and diagnosis scheme for radial distribution systems," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 19, no. 2, pp. 524–532, 2004.
- [5] V. Vita, T. Alimardan, and L. Ekonomou, "The Impact of Distributed Generation in the Distribution Networks' Voltage Profile and Energy Losses," *2015 IEEE Eur. Model. Symp.*, pp. 260–265, 2015.
- [6] H. E. Kassem, M. Badr, and S. A. Ahmed, "Reduction of energy losses in electrical distribution systems," in *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*, 2013, no. June, pp. 10–13.
- [7] R. Marcelo and R. Pérez, "Localización de fallas en redes de distribución eléctrica por sensado comprimido (compressive sensing)," *Univ. Politécnica Sales.*, no. Quito- Ecuador, pp. 1–20, 2017.
- [8] A. Girgis and S. Brahma, "Effect of distributed generation on protective device coordination in distribution system," *LESCOPE 2001 - 2001 Large Eng. Syst. Conf. Power Eng. Powering Beyond 2001, Conf. Proc.*, vol. 24, no. 1, pp. 115–119, 2001.
- [9] J. Kim, M. E. Baran, and G. C. Lampley, "Estimation of fault location on distribution feeders using PQ monitoring data," *2007 IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet. PES*, vol. 3, no. 1, pp. 7–10, 2007.
- [10] D. Criollo and R. Pérez, "Localizacion de fallas en sistemas electricos de distribucion de energia electrica usando generacion distribuida y basado en metodos algoritmicos," *Univ. Politécnica Sales.*, p. 21, 2016.
- [11] J. Mora, J. Melendez, and G. Carrillo, "Comparison of methods for fault location in power distribution systems," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 78, no. 4, pp. 1–8, 2008.
- [12] J. Pareja and R. Pérez, "Localización de fallas en sistemas eléctricos de distribución con generación distribuida usando máquinas de soporte vectorial," *Univ. Politécnica Sales.*, pp. 1–15, 2017.
- [13] M. Gandomkar, M. Vakilian, and M. Ehsan, "Optimal distributed generation allocation in distribution network using Hereford Ranch algorithm," *2005 Int. Conf. Electr. Mach. Syst.*, vol. 2, pp. 916–918, 2005.
- [14] L. S. A. Thomas Goöran Andersson, "Distributed generation: a definition. Electric Power Systems Research," *ELSEVIER*, vol. 57, no. 3, pp. 195–204., 2001.
- [15] M. Shekeew, M. Elshahed, and M. Elmarsafawy, "Impact of Optimal Location , Size and Number of Distributed Generation Units on the Performance of Radial Distribution Systems," in *International conference on environment and electrical engineering IEEEIC*, 2016, pp. 1–6.
- [16] J. A. Martinez and J. Martin-Arnedo, "Impact of distributed generation on distribution protection and power quality," *2009 IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, pp. 1–6, 2009.
- [17] E. Power and D. Handbook, "Sistems and generator in detail," *IEEE power & energy magazine*, no. 22 august. IEEE, 2005.
- [18] J. Ramírez-Ramírez, S. Pérez-

- Londoño, and J. Mora-Flórez, "Analysis of two fault locators considering operation variations of the power distribution systems," in *2015 IEEE 6th Latin American Symposium on Circuits and Systems, LASCAS - Conference Proceedings*, 2015, pp. 3–6.
- [19] A. S. Bretas and R. H. Salim, "Fault location in unbalanced dg systems using the positive sequence apparent impedance," in *2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, TDC*, vol. 00, pp. 1–6, 2006.
- [20] I. Standards, C. Committee, D. Generation, and E. Storage, *IEEE Std 1547.2-2008 IEEE Application Guide for IEEE Std 1547, IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*, no. 2009.
- [21] P. System, R. Committee, I. Power, and E. Society, *IEEE Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines IEEE Power and Energy Society*, Std C37.11., New York, NY: IEEE, 2014.
- [22] J. J. Jamian, H. A. Illias, K. Gia Ing, and H. Mokhlis, "Optimum distribution network operation considering distributed generation mode of operations and safety margin," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 10, no. 8, pp. 1049–1058, 2016.
- [23] M. Menchafou, Youssef; Markhi, Hassan; Zahri, Mustapha; Habibi, "Impact of distributed generation integration in electric power distribution systems on fault location methods," *3rd Int. Renew. Sustain. Energy Conf.*, 2015.
- [24] K. Divya and P. G. Student, "Optimal S iting and S izing of DG in R adial D istribution S ystem and I dentifying F ault L ocation in D istribution S ystem I ntegrated with D istributed G eneration," in *Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS), 2016 3rd International Conference on*, 2016, pp. 1–7.
- [25] K. Ramar and E. E. Ngu, "Generalized Impedance-Based Fault Location for Distribution Systems," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 27, no. 1, pp. 449–451, 2012.
- [26] M. Horinek, P. Bilik, and T. Wittassek, "A new fault location technique on radial distribution system using artificial neural network," *International Conference on Electricity Distribution.*, no. June, pp. 10–13, 2013.
- [27] E. C. Senger, G. Manassero, C. Goldemberg, and E. L. Pellini, "Automated fault location system for primary distribution networks," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 2 II, pp. 1332–1340, 2005.
- [28] J. L. HØIDALEN, H. K.; PRIKLER, L.; HALL, "ATPDraw - Graphical Preprocessor to ATP-EMTP . Windows version .," in *ATPDraw-Graphical preprocessor to ATP, Windows version*, 1999, pp. 20–24.